



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia e Desenvolvimento Regional - CTDR
Departamento de Tecnologia Sucroalcooleira-DTS



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE SORGO SACARINO PARA A PRODUÇÃO DE ETANOL EM COMPARAÇÃO COM A CANA-DE- AÇÚCAR

MAÍRA RAELY LIRA AZEVÊDO

Orientadora: Prof.^a: Dra. Solange Maria de Vasconcelos

João Pessoa

2017



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia e Desenvolvimento Regional - CTDR
Departamento de Tecnologia Sucroalcooleira–DTS



**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE SORGO SACARINO PARA A
PRODUÇÃO DE ETANOL EM COMPARAÇÃO COM A CANA-DE-
AÇÚCAR**

MAÍRA RAELY LIRA AZEVÊDO

Trabalho de Conclusão do Curso de Tecnologia em Produção Sucroalcooleira do Centro de Tecnologia e Desenvolvimento Regional da Universidade Federal da Paraíba, como requisito para a Graduação em Tecnologia em Produção Sucroalcooleira.

Orientadora: Prof.^a Dra. Solange Maria de Vasconcelos

João Pessoa

2017

A994a Azevedo, Maira Raely Lira.

Avaliação do potencial de sorgo sacarino para a produção de etanol em comparação com a cana-de-açúcar. [recurso eletrônico] / Maira Raely Lira Azevedo. -- 2017.

41 p.: il. color. + CD.

Sistema requerido: Adobe Acrobat Reader.

Orientador: Dra. Solange Maria de Vasconcelos.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação - Tecnologia Sucoalcooleira) – CTDR/UFPB.

1. Sorgo. 2. Etanol. 3. Fermentação – Sorgo sacarino. I. Vasconcelos, Solange Maria de. II. Título.

CDU: 633.17:661.722(043.2)

MAÍRA RAELY LIRA AZEVEDO

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE SORGO SACARINO PARA A
PRODUÇÃO DE ETANOL EM COMPARAÇÃO COM A CANA-DE-
AÇÚCAR**

TCC aprovado em 25/06/17 como requisito para a conclusão do curso de Tecnologia em Produção Sucrialcooleira da Universidade Federal da Paraíba.

BANCA EXAMINADORA:

Solange Maria de Vasconcelos

Prof^a. Dr^a. Solange Maria de Vasconcelos - (UFPB –Orientadora)

Erika Adriana de Santana Gomes

Prof^a. Dr^a. Erika Adriana Santana Gomes (UFPB – Membro Interno)

Ângela Lucinia U. Vasconcelos

Prof^a. Dr^a. Ângela Lucinia Urtiga Vasconcelos - (UFPB – Membro interno)

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais José Medeiros e Nailda Lira por terem sido os principais responsáveis por essa conquista. O amor de vocês me deram forças pra continuar. Dedico também aos queridos professores, por todo apoio e conhecimento transmitido durante essa jornada acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter tornado esse sonho possível. Por ter sido fiel e bondoso para comigo em todos os momentos.

A minha família por todo amor, base e princípios que hoje regem a minha vida.

Ao meu namorado Lucas Souza, por me passar toda confiança e segurança necessária que eu precisava para seguir com meus objetivos.

A minha orientadora prof^a Dr^a Solange Maria de Vasconcelos, pela confiança, apoio, amizade e por ter sido peça fundamental nessa conquista, sem a qual eu não teria realizado este sonho.

Aos meus queridos professores que contribuíram para a minha formação acadêmica. Em especial, a prof^a Dr^a Érika Adriana de Santana Gomes.

Ao Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA) – Estação Experimental de Itapirema – por ter disponibilizado as variedades de sorgo.

Aos técnicos de laboratório Aline Gouveia, Larissa Farias, Hébert Henrique, José Carlos, Claudia Gouveia, Aline Souza, Diego e Gisleânia, pelo auxílio nas execuções das análises, apoio, compreensão e amizade. Vocês são os melhores técnicos desta instituição.

Aos meus amigos da Universidade da Paraíba, Luan, Glauber, Elton, Antônio Carlos, Tialyson, Larissa, Karol e Tayná por todo o incentivo que me transmitiram durante a realização deste trabalho.

Aos meus amigos e irmãos, Matheus Cavalcante, Mateus Gomes, Vitória, Jackson, Cosme, os quais torceram e vibraram comigo esta conquista.

Ao laboratório de Processos Biotecnológicos (Departamento de antibióticos) da UFPE, por viabilizar as análises por HPLC.

A todos que contribuíram direta e indiretamente para a realização deste trabalho.

RESUMO

A demanda por etanol no Brasil tem crescido significativamente após a criação do programa PROALCOOL, que teve como objetivo incentivar a produção de etanol, reduzindo assim, a dependência de combustíveis de origem fósseis. O sorgo sacarino destaca-se por apresentar colmos longos e ricos em açúcares que podem ser destinados a produção de etanol combustível. O presente trabalho teve como principal objetivo, avaliar o potencial de sorgo sacarino para a produção de etanol, avaliando o seu rendimento, produtividade e eficiência fermentativa para duas variedades de sorgo sacarino (IPA 467-4-2 - seleção 2000; e IPA 8602600 - Ararapina 2010), comparando os resultados obtidos com a variedade de cana-de-açúcar (RB 92579). A fermentação do caldo extraído para ambas as matérias-primas, foram conduzidas em frascos de Erlenmeyer de 250 mL com 150 mL de mosto, nas seguintes condições: 16° Brix, pH 5,0, a 30°C, 100 rpm em incubadora shaker (LUCA-223), utilizando-se 1,5 g de levedura *Saccharomyces cerevisiae* (UFLA CA – 11). Os rendimentos ($Y_{p/s}$), obtidos foram de 0,35 e 0,41 g_{etanol}/g_{açúcares} para as variedades de sorgo, e 0,34 g_{etanol}/g_{açúcares} para cana. Para a eficiência fermentativa das variedades de sorgo foram encontrados valores de 67,73 % e 80,66 %, e 66,02 % para a variedade de cana. Em termos de produtividade, o sorgo obteve valores de 1,57 e 1,41 g/L/h, e a cana 1,96 g/L/h. O sorgo sacarino apresenta-se como matéria-prima promissora para a produção de etanol na entressafra de cana-de-açúcar.

Palavras-chaves: etanol, sorgo sacarino, fermentação, rendimento e produtividade.

ABSTRACT

The demand for ethanol in Brazil has grown significantly after the creation of the PROALCOOL program, whose objective was to encourage ethanol production, thus reducing dependence on fossil fuels. Saccharin sorghum stands out because it has long sugar-rich stalks that can be the production of ethanol production. The IPC 467-4-2 - selection 2000; And IPA 8602600 - The main objective of the present work was to evaluate sorghum sorghum for ethanol production, evaluating its yield, productivity and fermentative efficiency for two sorghum sorghum varieties (IPA 467-4-2 - Ararapina 2010). Results obtained with a variety of sugarcane (RB 92579). Fermentation of the broth extracted to the companies as raw materials were carried out in 250 mL Erlenmeyer flasks with 150 mL of must as follows: 16 ° Brix, pH 5.0, 30 ° C, 100 rpm in shaker incubator (LUCA-223), 1.5 g of yeast *Saccharomyces cerevisiae* is used (UFLA CA-11). The yields (Y_p / s) obtained were 0.35 and 0.41 $g_{ethanol} / g_{sugars}$ for the sorghum varied, and 0.34 $g_{ethanol} / g_{sugar}$ for the sugar cane. For an efficiency of sorghum varieties were found values of 67.73%, 80.66%, and 66.02% for a variety of sugarcane. In terms of productivity, the sorghum obtained values of 1.57 and 1.41 g / L / h, and the cane 1.96 g / L / h. Sorghum is a promising raw material for the production of ethanol in the sugar cane crop.

Keywords: ethanol, sorghum, fermentation, yield and productivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Principais diferenças entre a cana-de-açúcar e sorgo sacarino	20
Figura 2 - Processo de aeração da levedura.....	26
Figura 3 - Amostras submetidas ao processo de fermentação na incubadora shaker.	27
Figura 4 - Processo de destilação do mosto em micro destilador.....	28
Figura 5 - Concentração dos produtos e subprodutos do início e fim da fermentação da variedade I de sorgo sacarino.	32
Figura 6 - Concentração dos produtos e subprodutos do início e fim da fermentação da variedade II de sorgo sacarino.	32
Figura 7 - Concentração dos produtos e subprodutos do início e fim da fermentação da variedade III de cana-de-açúcar.	33
Figura 8 - Rendimento fermentativo para o sorgo sacarino e cana-de-açúcar.	35
Figura 9 - Eficiência fermentativa em relação ao rendimento teórico máximo de etanol (0,511 g etanol/g açúcares).....	36
Figura 10 - Produtividade em etanol	36
Figura 11 - Curva padrão da área por concentração de glicose.	41
Figura 12 - Curva padrão da área por concentração de frutose.....	41
Figura 13 - Curva padrão da área por concentração de glicerol.	42
Figura 14 - Curva padrão da área por concentração de etanol.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de matérias-primas agrícolas que podem ser utilizadas para a produção de etanol.....	15
Tabela 2 - Características do sorgo sacarino e da cana-de-açúcar na perspectiva da produção de etanol.	19
Tabela 3 – Comparação química entre as culturas de sorgo sacarino e cana-de-açúcar para a produção de etanol.	20
Tabela 4 - Resultados da análise de °Brix e pH para as variedades dos caldos (I,II do sorgo e III da cana-de-açúcar) utilizados nos experimentos.	30
Tabela 5 – Concentrações dos componentes da fermentação alcoólica.	31
Tabela 6 - Teor alcoólico do vinho fermentado expresso em (%).	34

Sumário

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivo	13
1.1.1 <i>Objetivos gerais</i>	13
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 A produção de Etanol no Brasil	14
2.2 Matérias primas para a obtenção do Etanol	15
2.3 Cana-de-açúcar	15
2.4 Sorgo Sacarino	16
2.5 Sorgo Sacarino x Cana-de-açúcar	18
2.6 Fermentação Alcoólica	21
2.7 Destilação	23
2.8 Rendimento e produtividade	24
3 MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1 Matéria-prima	25
3.2 Pré-tratamento do caldo	25
3.3 Experimentos Fermentativos	26
3.4 Destilação	28
3.5 Metodologia analítica	28
3.5.1 <i>Determinação da graduação alcoólica</i>	28
3.5.2 <i>Determinação das concentrações de substrato e produto</i>	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1 Caracterização do caldo extraído	30
4.2 Caracterização da fermentação alcoólica	31
4.2.1 <i>Teor alcoólico</i>	33
4.2.2 <i>Rendimento, eficiência e produtividade</i>	34
5 CONCLUSÃO	37
6 REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

O etanol possui fórmula molecular C_2H_6O , é considerado um combustível renovável, portanto, é uma fonte inesgotável. O processo de obtenção mais comum desse composto é a fermentação de açúcares presentes em matérias-primas ricas em açúcar e amido, como cana-de-açúcar, milho, beterraba e sorgo. O etanol destaca-se por ser um combustível ecologicamente sustentável, pois apresenta ciclo completo de carbono, ou seja, todo o gás carbônico lançado na atmosfera por sua produção é absorvido pela cana-de-açúcar, durante a fotossíntese (SANTOS, 2012).

A demanda por etanol no Brasil ocorre em larga escala, principalmente pela crescente criação dos carros *FLEX - FLUEL* e pelo aumento do índice de sua mistura com a gasolina, com o objetivo de aumentar a octanagem do combustível derivado do petróleo. Embora o aumento da sua produção tenha sido significativo nos últimos anos, esta não será suficiente para suprir a estimativa da demanda dos próximos anos, que pode chegar a ser o dobro da atual. Para suprir essa necessidade, é fundamental investir em culturas alternativas para a produção de etanol. A fim de aumentar essa produção e diminuir a sazonalidade desse combustível, o sorgo sacarino ganhou destaque por apresentar colmo doce e com grande potencial para a produção assim como, o da cana-de-açúcar (FERREIRA, 2015).

Esta matéria-prima pode ser empregada durante a entressafra da cana-de-açúcar em áreas de reforma de canaviais. A cultura não precisa de equipamentos e insumos alternativos desde o plantio que se dá através de sementes (5 a 7 kg.ha^{-1}), tratos culturais e colheita. A mesma apresenta alta capacidade de produção de etanol (3 mil a 6 mil $L.ha^{-1}$) (EMBRAPA, 2012).

Diferentemente da cana-de-açúcar, o sorgo sacarino apresenta ciclo vegetativo curto (90 a 120 dias), proporcionando mais de um cultivo ao ano. Possui colmos ricos em açúcares diretamente fermentescíveis (sacarose, glicose e frutose), além de nutrientes indispensáveis para o desenvolvimento da levedura (MAY *et al.*, 2013).

O objetivo deste trabalho foi realizar um estudo de viabilidade na produção de etanol a partir do sorgo sacarino, comparando a sua produtividade com a cana-de-açúcar.

1.1 Objetivo

1.1.1 Objetivos gerais

Avaliar a viabilidade da produção de etanol a partir de duas variedades de sorgo sacarino, cultivada no Estado de Pernambuco. E comparar a produção de etanol a partir do sorgo a da cana-de-açúcar.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram:

- Realizar o tratamento do caldo de sorgo e de cana-de-açúcar para minimizar o efeito de inibidores da levedura;
- Fermentar os caldos tratados, utilizando uma linhagem industrial de *Saccharomyces cerevisiae*;
- Calcular o rendimento e as produtividades das fermentações alcoólicas;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A produção de Etanol no Brasil

O etanol também conhecido como álcool etílico possui fórmula molecular C_2H_6O , é um composto orgânico proveniente de matérias-primas ricas em carboidratos. A matéria-prima de maior destaque considerando seu volume de produção, rendimento e custo em escala industrial é a cana-de-açúcar, por apresentar altos teores de sacarose em seu colmo (FERREIRA, 2015).

Desde a primeira crise do petróleo, a busca por combustíveis de fontes renováveis tem aumentado com o objetivo de diminuir a poluição causada por combustíveis de origens fósseis. Por essa razão, o etanol tem ganhado destaque por se tratar de um combustível com grande potencial na redução dos gases de efeito estufa (RODRIGUES e ORTIZ, 2006).

O Programa Brasileiro de Álcool (PROALCOOL), que teve início na década de 1970, com o objetivo de incentivar a produção de álcool combustível visando à diminuição da dependência do petróleo, é o mais importante programa de energia a partir de biomassas (SANTOS *et al.*, 2012).

Com a inicialização do Programa Proálcool, a produção de etanol atingiu picos de 12,3 bilhões na safra de 1986-1987, com isso as indústrias automobilísticas passaram a investir na fabricação de carros movidos a álcool (CONAB, 2016).

As complementações na produção de etanol desde o início do PROALCOOL têm sido observadas nos ganhos na produtividade agrícola e industrial, como também nas áreas de cana cultivada. Esses avanços tecnológicos têm permitido a redução de custos na produção de etanol (LEITE *et al.*, 2009).

A produção total de cana-de-açúcar na safra 2015/2016 foi estabelecida em 665,6 milhões de toneladas, com um aumento de 4,9 % em relação à safra anterior (CONAB, 2016).

Os combustíveis de fontes renováveis liberam cerca de 50% a menos de material particulado e, 98% a menos de enxofre (GOMES, 2014).

Estima-se que a produção de etanol na safra 2016/2017 mantenha-se acima de 27,5 bilhões de litros, redução de apenas 9,7% em relação a safra anterior, devida a preferência pela produção de açúcar (CONAB, 2017).

2.2 Matérias primas para a obtenção do Etanol

As matérias-primas que são utilizadas para a produção de etanol via fermentação são de origem agrícola, onde nem todas as culturas, são economicamente viáveis. Portanto, a escolha da matéria-prima para a produção de etanol depende de fatores externos de adaptabilidade da cultura a fatores climáticos e de cultivo, que vão proporcionar a maneira mais viável para obtenção deste combustível (SANTOS; BORÉM; CALDAS, 2012).

As principais matérias-primas de origem agrícola representativas para a produção de etanol seguem na Tabela 1, em três grandes grupos.

Tabela 1 - Tipos de matérias-primas agrícolas que podem ser utilizadas para a produção de etanol.

Açucaradas (Etanol de 1º geração)	Cana-de-açúcar, beterraba, melão e sorgo sacarino
Amiláceas (Etanol de 1º geração)	Cereais: Milho, cevada, malte, trigo, aveia, arroz. Tubérculos: Batata, batata-doce, raiz de girassol.
Celulósicas (Etanol 2º geração)	Madeira, bagaço de cana-de-açúcar, bagaço e semente de sorgo sacarino, resíduos de milho, polpa de beterraba.

Fonte: Adaptado de Santos; Borém; Caldas, 2012.

Esses tipos de matérias-primas são utilizados para obtenção do etanol em diversos países, diversificando a matéria-prima utilizada pela disponibilidade das condições climáticas e cultivos que favorecem o seu crescimento e produtividade (SANTOS; BORÉM; CALDAS, 2012).

2.3 Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar trazida da Ilha da Madeira por Martim Afonso de Souza chega ao Brasil no ano de 1532, onde foi inicialmente plantada na Capitania de São Vicente, com a implantação do primeiro engenho de açúcar no Brasil.

Posteriormente, muitos outros se proliferaram pela costa brasileira, sobretudo no litoral dos estados de Pernambuco e Bahia (SANTOS; BORÉM, 2012).

O cultivo da cana-de-açúcar no Brasil passou por dois momentos desfavoráveis, o primeiro foi com a introdução da cultura na América Central, onde a mesma apresentou bons resultados em Cuba, ocasionando uma redução no cultivo brasileiro. O segundo diz respeito ao desenvolvimento tecnológico da produção de açúcar a partir da beterraba pelos franceses, reduzindo assim a compra do açúcar de cana brasileira pelos europeus (CARVALHO *et al.*, 2013).

Em meados do século XIX, devido ao declínio do consumo de açúcar no mercado europeu, a cana-de-açúcar perde espaço e deixa de ser o principal produto nacional. No ano de 1889, o açúcar ocupava o terceiro lugar no *ranking* das exportações brasileiras, atrás apenas do café e da borracha. Em 1910 houve uma queda para o sexto lugar. Nos últimos anos, o Brasil vem ocupando o primeiro lugar no ranking mundial da cultura, a qual se destaca por apresentar um bom potencial no aumento da produção com baixos custos (RODRIGUES, 2010).

De acordo com Santos e Borém (2012), a composição da cana-de-açúcar depende de fatores como, variedade da cana, estágio de maturação, condições climáticas, tempo entre corte e colheita, onde pode ocorrer a deterioração da matéria-prima, entre outros fatores. Sua composição apresenta cerca de 75% de água, 25% de matéria orgânica, sendo 0,5% de material mineral. O caldo proveniente do processo de extração da cana-de-açúcar contém cerca de 82% de água e 18% de sólidos solúveis (Brix), dos quais aproximadamente 0,4% de glicose, 0,2% de frutose e 14% de sacarose.

A cana madura deve ser colhida e processada o mais rápido possível em um período de 24 horas, para que não haja a degradação da mesma e ocasione à baixa produtividade. Quanto mais prolongado for o tempo entre corte e moagem, maiores os riscos de deterioração física, química, enzimática ou microbiana, prejudicando, portanto, todo o processo e qualidade do produto final (LIMA *et al.*, 2001).

2.4 Sorgo Sacarino

O sorgo sacarino (*Sorghum bicolor* L. Moench) é uma cultura monocotiledônea de metabolismo C4, de dias curtos e taxas fotossintéticas altas, originária da África e é caracterizada principalmente por apresentar colmo succulento

e rico em açúcares. É o quinto cereal mais importante do mundo, ficando atrás apenas do trigo, milho, arroz e cevada (FERREIRA, 2015).

Segundo Moura (2017), a raiz apresenta uma grande quantidade de pêlos absorventes, com presença de sílica na endoderme e lignificação do periciclo, o que possibilita a cultura uma maior tolerância ao excesso de umidade e maior resistência a estresses hídricos. O caule do tipo colmo é dividido em nós e entrenós, estes determinam a altura da planta que pode atingir de 1,20 a 4,00 metros de altura.

O sorgo possui características fisiológicas que permitem paralisar o seu crescimento, diminuindo assim as atividades metabólicas durante o estresse hídrico. E após esse período a planta pode chegar a desenvolver mais rapidamente se comparada àquelas que não sofreram estresse hídrico (BONFIM-SILVA *et al.*, 2011)

A planta adulta na sua fase de reprodução desenvolve uma inflorescência terminal do tipo panícula. O sorgo apresenta um ciclo de três fases, divididas em: vegetativa, a qual é caracterizada pela germinação e crescimento, fase reprodutiva responsável pela diferenciação do meristema floral e a fase de maturação dos grãos (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

O termo “sacarino” segundo Ferreira (2015), é utilizado para tipos de sorgo que apresentam colmo suculento, rico em açúcar e de elevado potencial na produção de grãos. A produção de biomassa pode chegar há 40 - 70 t.ha¹, com o Brix variando de 16 – 23%. O acúmulo destes açúcares se dá na fase de floração e é contínuo até a fase de maturação da planta.

O sorgo sacarino apresenta-se como excelente matéria-prima destinada para a produção de etanol, visto que a cultura apresenta baixo custo de cultivo, por ser uma planta com alta eficiência fotossintética, resistente à seca e que utiliza o mínimo de fertilizante para o seu cultivo (MOURA, 2017).

Ao atingir sua fase de maturação, o sorgo sacarino destinado à produção de etanol, passa por um processo de moagem, onde será possível a extração de uma fração líquida rica em açúcares fermentescíveis, chamada caldo. Neste processo é obtido um resíduo sólido, chamado de bagaço que também pode ser empregado para a produção de energia. O caldo obtido da extração contém cerca de 10% de ART e 12 °Brix, tratando-se de uma matéria-prima altamente viável para a fermentação alcoólica (SANTOS, 2012).

Por volta da década de 1970, a Embrapa iniciou um programa de melhoramento genético de sorgo, com o objetivo de investir no potencial dessa cultura. A área plantada de sorgo no Brasil é de aproximadamente de 1,5 milhões de hectares (PURCINO, 2011).

A etapa de melhoramento genético de sorgo, realizada pela Embrapa milho e sorgo através do Plano Nacional de Agroenergia (P11NA), busca genótipos de sorgo cada vez mais resistentes a fatores climáticos, com maiores quantidades de açúcares que garantam maior produtividade.

Por apresentar diversas características semelhantes à cana-de-açúcar e por ser uma cultura bastante resistente a estresses hídricos, e de fácil adaptabilidade, o sorgo apresenta-se como uma matéria-prima promissora para a produção de etanol, por apresentar alta produtividade de biomassa verde, altos rendimentos de etanol e ainda possuir um bagaço que pode ser utilizado como fonte de energia (GUIDOLIM, 2012),

O sorgo pode contribuir de forma positiva para a sazonalidade deste combustível na entressafra da cana, conseguindo até ser processado juntamente com a cana-de-açúcar após seu período de maturação (FERREIRA, 2015).

2.5 Sorgo Sacarino x Cana-de-açúcar

O sorgo sacarino assemelha-se a cana-de-açúcar no processamento e utilização do caldo extraído dos colmos, podendo ser destinado para a produção de etanol. Nos testes realizados em escala piloto-industrial por algumas usinas, esta cultura mostrou-se com alto potencial no ponto de vista agrônômico e industrial como mostra a Tabela 2 (EMBRAPA, 2004).

Tabela 2 - Características do sorgo sacarino e da cana-de-açúcar na perspectiva da produção de etanol.

Parâmetros	Sorgo Sacarino	Cana-de-açúcar
Tipo de plantio	Propagação por sementes	Propagação vegetativa
Tempo de ampliação de escala	Propagação por sementes – menor	Propagação vegetativa – maior
Áreas marginais	Cultivo em áreas marginais	Limitada em áreas marginais
Ciclo de crescimento (meses)	3 – 4,5	9-18
Água utilizada (L de água/Kg de biomassa seca)	300	600
Produção de Etanol (100 L ha⁻¹/mês)	0,75 a 0,9	0,58 a 0,62
Produção de biomassa (t ha⁻¹)	60	80 a 85
Custo (R\$/ ha)	2.700	4.000

Fonte: Gomes, 2014.

Segundo Gomes (2014), o ciclo vegetativo de sorgo encontra-se aproximadamente em 3 a 4 meses, enquanto que o da cana é estabelecido aproximadamente em 12 meses.

Embora o sorgo assemelhe-se a cana-de-açúcar em alguns aspectos, existem algumas diferenças significativas entre as duas culturas. O sorgo sacarino apresenta cultivo a partir de sementes, maior adaptação a climas tropicais e temperados e necessita aproximadamente de 50% a menos de água do que a cana-de-açúcar (GUIMARÃES, 2013). A Figura 1 representa algumas diferenças de produtividade entre essas duas culturas.

Figura 1- Principais diferenças entre a cana-de-açúcar e sorgo sacarino



Fonte: Embrapa (2012).

Embora o sorgo sacarino e a cana-de-açúcar apresentem semelhanças na sua composição, a concentração de sacarose no caldo de sorgo apresenta valores inferiores ao da cana e ambas contêm concentrações semelhantes de açúcares totais (GOMES, 2014).

Tabela 3 – Comparação química entre as culturas de sorgo sacarino e cana-de-açúcar para a produção de etanol.

Parâmetros	Sorgo Sacarino	Cana-de-açúcar
(°Brix)	15–19	18–25
Pureza	60–75	80–90
Fibra (%)	12–20	10–15
Sacarose (%)	8–13	14–22
AR (%)	1–3	0,5–1
Glicose (%)	0,5–2	0,2–1
Frutose (%)	0,5- 1,5	0 -0,5
ART (%)	12 – 17	15 – 24
Amido (%)	Até 0,5	0,001 – 0,05
Agua	84	75 – 88

Fonte: Gomes, 2014.

Como na cana-de-açúcar, o tempo excedido da colheita do sorgo sacarino pode levar a redução de °Brix e da quantidade de sacarose presente no caldo, baixando o rendimento produtivo e acarretando no aumento da concentração de amido. O amido presente no sorgo sacarino encontrado em maiores quantidades do que na cana-de-açúcar, pode afetar a qualidade do etanol produzido devido a sua influência na fisiologia da levedura em fermentação. Uma alternativa seria a utilização deste elemento para a produção de etanol por meio da utilização de enzimas que convertem o amido em glicose, aumentando assim, o rendimento da produção de etanol (GOMES, 2014).

Segundo Ferreira (2015), a molécula de amido é característica do sorgo e encontra-se localizada principalmente na panícula, nos grãos de sorgo. Quanto maior o nível de maturação da planta maior a quantidade de amido presente na planta, ou seja, a quantidade dessa molécula presente na planta está diretamente relacionada com o estágio de maturação e genótipo da planta. O período ideal de colheita do sorgo para maximizar o rendimento em termos quantitativos e qualitativos é conhecido como período pastoso dos grãos.

2.6 Fermentação Alcoólica

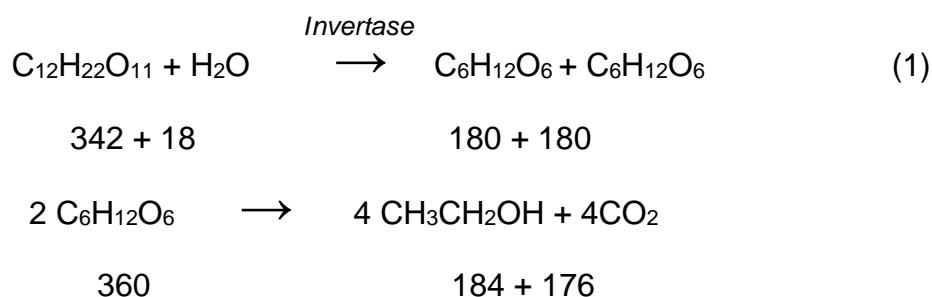
A fermentação alcoólica caracteriza-se por ser um processo biológico no qual os açúcares são convertidos em energia celular com produção de etanol e dióxido de carbono. A levedura é o principal micro-organismo responsável por converter os carboidratos presentes na matéria-prima em etanol e CO₂, destacando-se entre as demais por apresentar um bom rendimento alcoólico e maior resistência a ambientes estressantes (FERRARI, 2013).

O principal objetivo da levedura ao metabolizar o açúcar anaerobicamente é a produção da energia química celular (ATP), necessária as suas atividades metabólicas de adaptação, crescimento e multiplicação celular, resultando em subprodutos como etanol e gás carbônico (STEINLE, 2013).

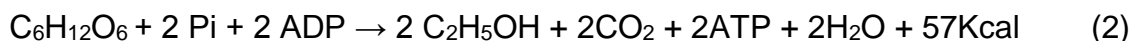
O processo fermentativo tem início no momento em que é adicionado fermento no mosto (caldo açucarado). Nesta etapa de fermentação existem três fases que são extremamente importantes para o desenvolvimento da levedura e maior rendimento de etanol. A primeira fase é conhecida como fase de adaptação dos micro-organismos ao novo ambiente, nesta, ainda é necessário a presença de

oxigênio para melhor desenvolvimento das leveduras. Caracteriza-se como segunda fase, o momento de multiplicação dos micro-organismos e o desprendimento de gás carbônico, resultando no aumento da temperatura e do teor alcoólico do mosto. Na terceira e última fase, o crescimento da levedura diminui pela escassez de alimento, neste momento há diminuição de gás carbônico e precipitação do fermento. Ao final da fermentação o produto obtido é um vinho bruto, apresentando 8 a 12 % de álcool (SOUSA e MONTEIRO, 2011).

Segundo Steinle (2013), a produção de etanol e gás carbônico originadas da fermentação alcoólica pode ser representada em quantidades estequiométricas na Equação 1.



A fermentação alcoólica envolve 11 reações em sequência ordenada conhecida como via glicolítica, sendo cada reação catalisada por uma enzima específica. De forma geral, a equação que melhor representa a fermentação alcoólica pela transformação do carboidrato (glicose) em etanol e gás carbônico é a equação de Gay-Lussac, apresentada na Equação 2 abaixo (SANTOS, 2008).



Em relação ao rendimento teórico de etanol produzido, a estequiometria utilizada é de 0,511 g/g de glicose, porém, parte das reações que acontecem de forma secundária resulta na redução do rendimento teórico esperado. Substratos complexos utilizados no processo fermentativo, na presença de corpos estranhos encontrados no meio (fibras, leveduras selvagens, gomas), fazem com que parte do açúcar metabolizado pela levedura transforme-se em subprodutos, reduzindo o rendimento industrial para 90% (FERRARI, 2013).

Existem diversos fatores que afetam o processo fermentativo. Dentre estes se destacam: pH, temperatura, acidez, presença de micro-organismos contaminantes, concentração de açúcares no meio, disponibilidade de nutrientes e etanol. Na ausência de cuidados durante o procedimento, pode ocorrer a contaminação do mosto por micro-organismos indesejáveis na fermentação sucedendo um baixo rendimento. O pH é um dos fatores que possui grande importância para o controle da contaminação bacteriana na fermentação, por essa razão é indispensável o tratamento ácido do meio durante a fermentação. Os valores de pH para mostos industriais, encontram-se na faixa de 4,5 a 5,5 (MASSON, 2013).

2.7 Destilação

O vinho obtido da fermentação alcoólica apresenta em sua composição 88 a 93% de água, 12 a 7% de etanol e outros álcoois como ésteres e outras impurezas sólidas em pequenas proporções. Por meio da destilação o etanol é separado em grau de pureza e concentrações variáveis. A destilação por sua vez, é uma operação unitária que visa a separação de componentes de uma mistura de acordo com a volatilidade dos componentes (ZANARDI E JUNIOR, 2016).

O aquecimento de uma mistura água-álcool, até a temperatura adequada, ocasionará a mudança de estado do álcool de líquido para vapor e, posteriormente, para o estado líquido, após submeter o vapor ao resfriamento (condensação). Com este processo, busca-se a recuperação de álcool dentro dos padrões de qualidade estabelecidos. Para obter um processo eficiente dos equipamentos, devem-se controlar as temperaturas nas diversas fases do processo, como também as vazões de alimentação da água de refrigeração e trocadores de calor. Este processo proporcionará um álcool etílico mais concentrado. A separação destes componentes de uma só vez não é possível devido a temperatura de ebulição que varia conforme o percentual de cada componente na mistura (RIBEIRO FILHO *et. al.*; 2008)

2.8 Rendimento e produtividade

O rendimento em gramas de etanol por gramas de substrato, $Y_{p/s}$, rendimento da fermentação, em percentagem e produtividade em etanol, Q_p , foram calculados conforme as Equações 3, 4 e 5, respectivamente.

$$Y_{p/s} = \frac{\Delta P}{\Delta S} \quad (3)$$

$$Rend (\%) = \frac{Y_{p/s}}{0,511} \times 100 \% \quad (4)$$

$$Q_p = \frac{P}{t} \quad (5)$$

Onde:

S= concentração de substrato (g/L)

P = concentração de produto (g/L)

$Y_{P/S}$ = rendimento de produto em substrato (g/g)

Q_p = produtividade de etanol (g/L/h)

t = tempo de fermentação (h)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Matéria-prima

As variedades de sorgo sacarino utilizadas nos experimentos foram fornecidas pelo Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA) – Estação Experimental de Itapirema, Goiana-PE, cujas variedades foram: IPA 467-4-2 (Seleção 2000) e IPA 8602600 (DACCSG) Araripina 2010. A cana-de-açúcar utilizada no experimento foi a RB 92579 fornecida pela usina D'Pádua.

As matérias-primas foram submetidas a uma lavagem para retirada de material grosseiro. Posteriormente, as mesmas passaram por um processo de extração do caldo por moagem, a fim de se obter o caldo para ser utilizado nos experimentos realizados nos Laboratórios do Centro de Tecnologia e Desenvolvimento Regional (CTDR).

O caldo utilizado nos experimentos foi congelado a 20°C.

3.2 Pré-tratamento do caldo

O caldo de sorgo sacarino, em uma quantidade de 600 mL foi submetido a um aquecimento de 65 °C, em banho-maria, por 40 min. Ao final do processo de aquecimento, adicionou-se o leite de cal 10% p/v até atingir um pH 6,0. A clarificação foi realizada pela adição de 24 g de Octapol®, segundo a Consecana (2014). Após a adição do agente clarificante, o caldo foi decantado por 45 min. Posteriormente, foi submetido a uma filtração a vácuo em filtros qualitativos 125 mm, a fim de se obter um caldo clarificado e menos sujeito a contaminações. Na sequência, o °Brix foi ajustado para 16 (nos tratamentos que apresentaram valores superiores), com a diluição do caldo com água livre de impurezas. O pH foi ajustado para 5,0 com H₂SO₄ 3 mol L⁻¹, resultando no mosto. As mesmas condições de tratamento do caldo foram utilizadas para a cana-de-açúcar.

3.3 Experimentos Fermentativos

Para os experimentos realizados, foram utilizados os mostos das matérias-primas de sorgo sacarino e cana-de-açúcar. As fermentações foram realizadas em duplicata, buscando as mesmas condições de fermentação para obtenção de melhores resultados. A linhagem de levedura utilizada foi a *Saccharomyces cerevisiae* – UFLA CA - 11, utilizada no processo industrial de uma fermentação alcoólica.

A etapa de multiplicação, adaptação e ativação das células, procedeu a partir de 1,50 g de fermento seco. A hidratação do fermento deu-se com 15 mL de solução de glicose a 0,5%, aerando-se por 1 hora como mostra a Figura 2 a seguir.

Figura 2 - Processo de aeração da levedura.



Fonte: Autor, 2017.

Após o término da aeração do fermento, foi realizada a primeira alimentação com 75 mL do caldo, aerando-se o mesmo novamente por 1 hora para melhor adaptação da levedura ao meio. Posteriormente, adicionou-se mais 75 mL do caldo iniciando-se o processo de fermentação nas condições de agitação 100 rpm e controle de temperatura mantida em 30° C, em incubadora shaker (LUCA-223). A Figura 3 representa a maneira como esse procedimento foi executado.

Figura 3 - Amostras submetidas ao processo de fermentação na incubadora shaker.



Fonte: Autor, 2017

O processo de fermentação foi monitorado pela leitura horária do °Brix em refratômetro digital Nova DR500. O final da fermentação foi determinado quando o °Brix manteve-se constante após duas leituras consecutivas.

Após 30 min do início da fermentação e ao final do processo, filtraram-se 5 mL da amostra para análise do substrato e produto.

O vinho obtido pela fermentação foi centrifugado por uma centrífuga de bancada NI 1811, com uma rotação de 4000 rpm/ 5min.

3.4 Destilação

Uma fração de 50 mL do vinho foi centrifugada e em seguida destilada em um micro destilador de bancada (BFEMDA80), como mostra a Figura 4.

Figura 4 - Processo de destilação do mosto em micro destilador.



Fonte: Autor, 2017.

3.5 Metodologia analítica

3.5.1 Determinação da graduação alcoólica

Ao final da fermentação determinou-se o teor alcoólico de 50 mL de vinho através de um ebulliômetro (Tech Vision Ltda). O teor alcoólico do destilado foi verificado (°GL) em densímetro portátil (KEM, DA – 130 N).

3.5.2 Determinação das concentrações de substrato e produto

A quantificação de açúcares (glicose e frutose), do etanol e do glicerol foi realizada através de cromatografia líquida de alta eficiência (Agilent 1100), utilizando-se uma coluna HPX87H (Bio-Rad), temperatura de 60 °C, fase móvel: H₂SO₄ mM e fluxo 0,6 mL/min (VASCONCELOS, 2012).

A identificação e quantificação dos componentes foram realizadas tomando-se por base uma curva padrão para cada componente (Apêndice A).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização do caldo extraído

Os resultados obtidos para o caldo extraído das duas matérias-primas utilizadas estão representados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados da análise de °Brix e pH para as variedades dos caldos (I,II do sorgo e III da cana-de-açúcar) utilizados nos experimentos.

Matéria-prima	Nomenclatura	Brix	pH
Sorgo – I	IPA 467-4-2 (DACCSG, 2010)	18,0	5,0
Sorgo - II	IPA 8602600 (DACCSG)	16,0	5,0
Cana - III	RB92579	18,0	5,0

Fonte: Autor, 2017

O sorgo sacarino assemelha-se a cana por apresentar colmos ricos em açúcares. De acordo com Gomes (2014), os valores de °Brix presente no sorgo sacarino está entre 15° a 19°, enquanto que a cana-de-açúcar possui valores entre 18-25°Brix. As variedades apresentaram valores de °Brix dentro do intervalo estabelecido para concentrações de sólidos solúveis.

Comparando os valores de °Brix dos caldos das duas matérias-primas utilizadas nos experimentos, observa-se que a variedade de sorgo sacarino IPA 8602589 (DACCSG, 2010) apresentou mesmo valor de sólidos solúveis presentes na variedade de cana-de-açúcar RB95579. Entretanto, o °Brix da cana-de-açúcar foi afetado devido à época em que a mesma foi colhida, estando fora do período de maturação.

Segundo Prati e Camargo (2008), o pH do caldo de cana é pouco ácido, variando entre 5,0 e 6,0. Nesta faixa de pH, o caldo apresenta-se altamente perecível em termos microbiológicos se encontrados na presença de altas concentrações de açúcares (PRATI; CAMARGO, 2008).

4.2 Caracterização da fermentação alcoólica

Os resultados obtidos nas análises dos componentes das fermentações, em termos de concentrações, foram obtidos por cromatografia líquida de alta eficiência e estão apresentados na Tabela 5. Através dos dados, pode-se observar o início de cada fermentação onde a concentração de açúcares eram maiores em relação ao final das mesmas, e conseqüentemente ocorreu a produção de etanol.

Parte dos açúcares consumidos que não produziram etanol, podem ter ocasionado a produção de outros subprodutos como, o glicerol.

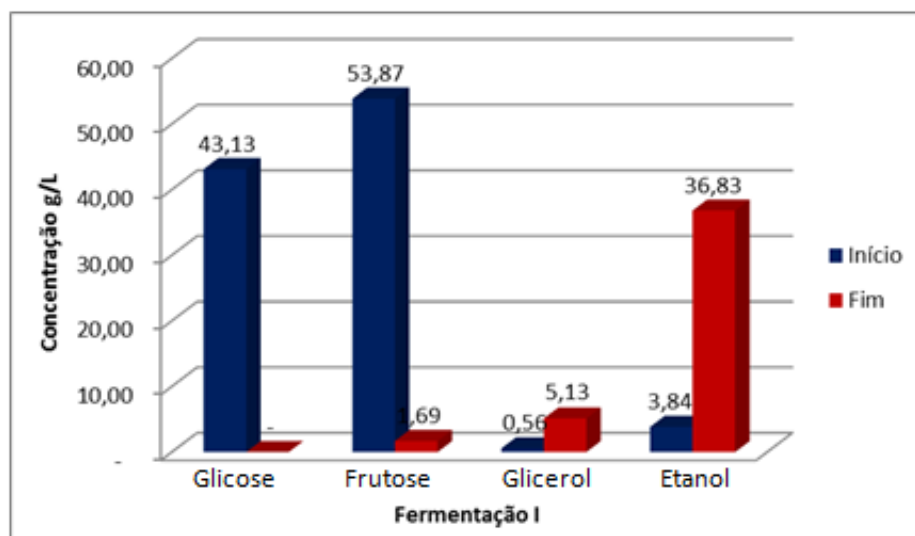
Tabela 5 – Concentrações dos componentes da fermentação alcoólica.

Matéria-prima	t (h)	Glicose (g/L)	Frutose (g/L)	Glicerol (g/L)	Etanol (g/L)
Sorgo - I	0,5	43,13 ± 2,17	53,87 ± 0,46	0,56 ± 0,57	3,84 ± 0,68
	21	0,00 ± 0,00	1,69 ± 0,02	5,13 ± 0,69	36,83 ± 4,35
Sorgo - II	0,5	31,49	44,64	0,00	1,09
	21	0,00	4,10	5,00	30,78
Cana - III	0,5	65,02	71,20	0,02	3,20
	22	0,00	8,64	6,72	46,23

Fonte: Autor, 2017.

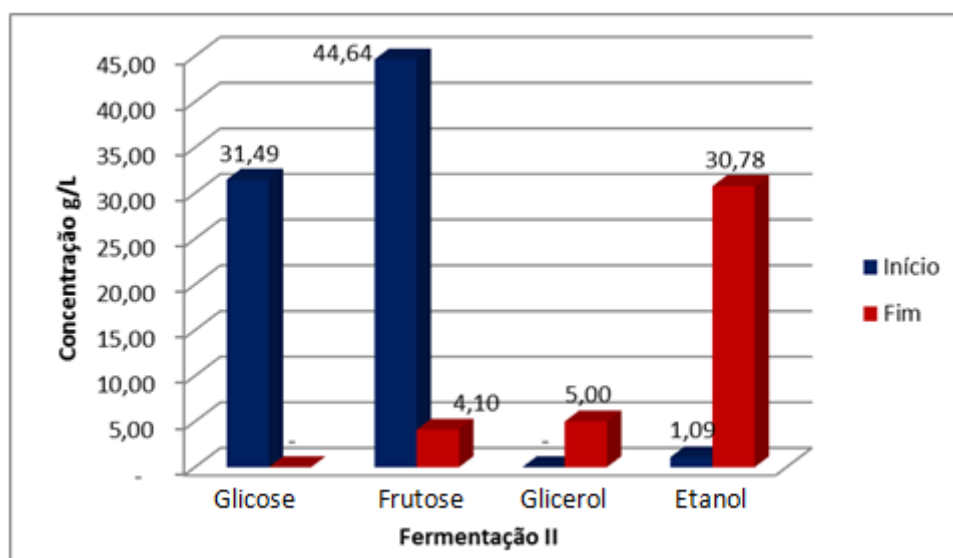
Estes resultados podem ser melhor visualizados nas Figuras 6, 7 e 8, respectivamente.

Figura 5 - Concentração dos produtos e subprodutos do início e fim da fermentação da variedade I de sorgo sacarino.



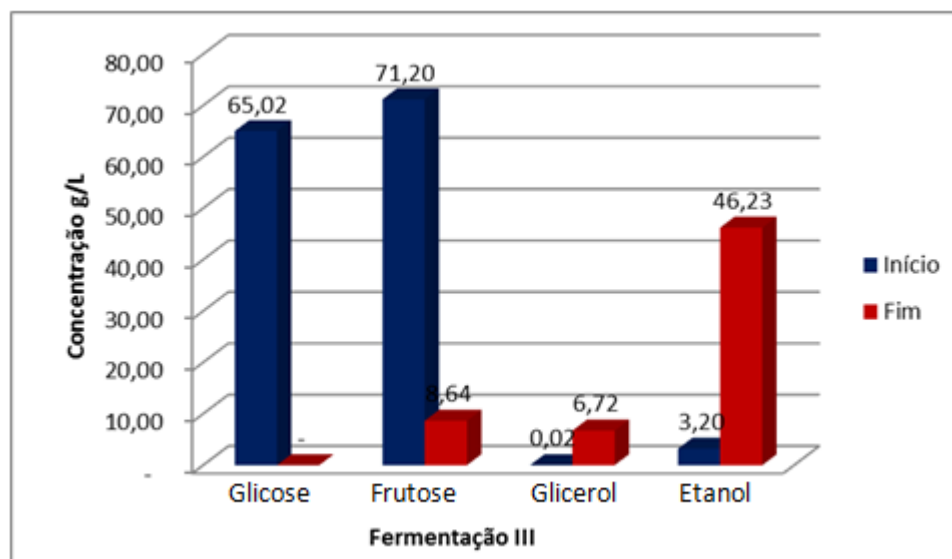
Fonte: Autor, 2017

Figura 6 - Concentração dos produtos e subprodutos do início e fim da fermentação da variedade II de sorgo sacarino.



Fonte: Autor, 2017

Figura 7 - Concentração dos produtos e subprodutos do início e fim da fermentação da variedade III de cana-de-açúcar.



Fonte: Autor, 2017

4.2.1 Teor alcoólico

Para Aquarone apud Galdino (2013), um bom processo fermentativo apresenta teores alcoólicos do vinho entre 6 a 8 %. Na Tabela 6, encontram-se os teores alcoólicos (°GL), para o vinho e para o destilado. Observa-se que todas as variedades ficaram dentro da faixa descrita pela literatura, sendo, portanto, todos os processos fermentativos satisfatórios para graduação alcoólica do vinho.

A graduação alcoólica obtida para o destilado I apresentou valores concordantes para a matéria-prima de sorgo sacarino, encontrados por Ribeiro Filho *et. al.*; (2008), 62 a 88 °GL. Entretanto, a variedade II encontra-se abaixo do intervalo descrito pelo autor. A mesma variedade obteve um teor alcoólico de 8,0 % no vinho, e encontra-se dentro da faixa reportada pela literatura. Esta contradição entre o vinho e destilado, pode ter sido ocasionada devido ao possível arraste de água pelo equipamento, que foi identificada após a retirada de quantidades menores da amostra, para medição de teor alcoólico. Com isso, foram alcançados teores alcoólicos satisfatórios para o destilado.

Tabela 6 - Teor alcoólico do vinho fermentado expresso em (%).

Variedades	Vinho (% v/v)	Destilado (% v/v)
Sorgo - I	6,6	84,8
Sorgo - II	8,0	24,5
Cana - III	8,6	83,6

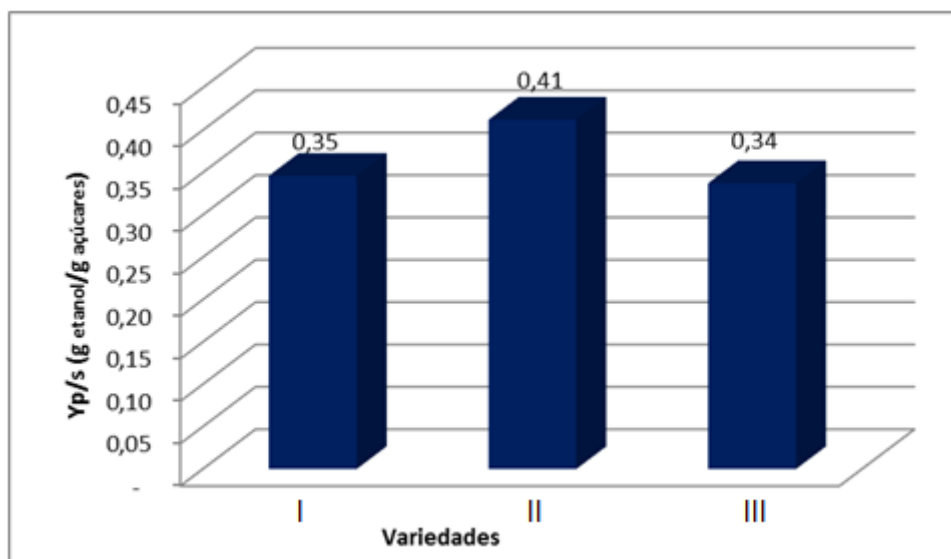
Fonte: Autor, 2017

4.2.2 Rendimento, eficiência e produtividade

Os rendimentos das fermentações, considerando a conversão de açúcares em etanol determinados pela Equação (5) (Item 3.5.3), estão apresentados na Figura 8. Para as diferentes variedades de sorgo, observa-se que o rendimento variou de 0,35 a 0,41 g de etanol/ g de açúcares. Esta diferença de rendimento entre as duas variedades pode ter sido influenciada pela qualidade da matéria-prima, dentre outros fatores que afetam o rendimento fermentativo como, a não utilização nutrientes, contaminação bacteriana e condições de aeração não favoráveis para uma melhor multiplicação das leveduras.

Conforme mencionado pelo Item (2.6), o rendimento teórico de etanol encontrado pela estequiometria é de 0,511. Assim sendo, os rendimentos encontrados tanto para a cana-de-açúcar como para as variedades de sorgo, ficaram abaixo do rendimento teórico máximo.

Figura 8 - Rendimento fermentativo para o sorgo sacarino e cana-de-açúcar.



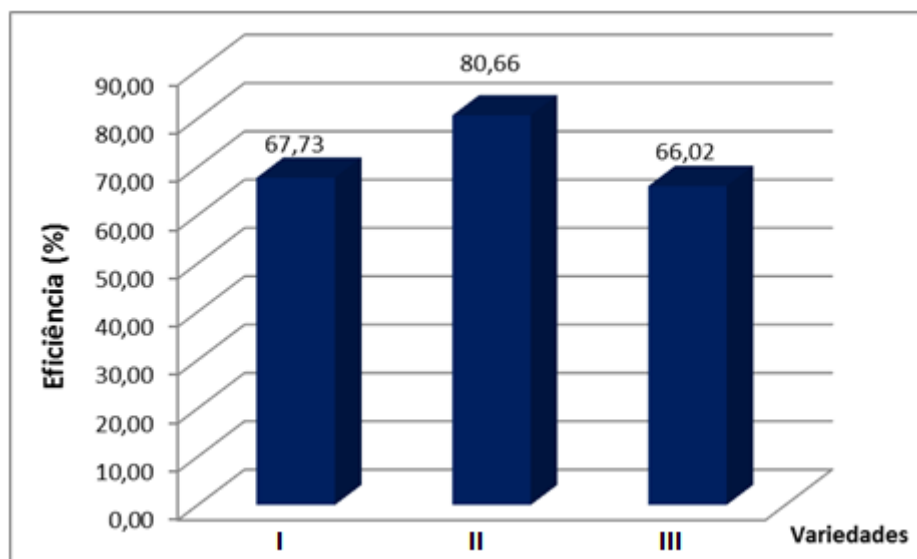
Fonte: Autor, 2017

A Figura 9 representa a eficiência das fermentações em relação ao rendimento teórico máximo. Para a fermentação do caldo de cana (variedade III), observa-se que foi obtida uma eficiência de 66,02 %. Enquanto que para os caldos de sorgo, as eficiências foram de 67,73 e 80,66%.

De acordo com Massom (2013), em processos industriais conduzidos de forma adequada, a eficiência fermentativa chega a alcançar valores de 90 a 92 % do rendimento estequiométrico. Silva *et al.* (2008), encontrou valores de eficiência, variando entre 86,64 a 94,45 % nas fermentações de caldo de cana.

Os valores de eficiência encontrados neste trabalho ficaram abaixo dos relatados na literatura. Este fato pode ter ocorrido, devido a uma possível deficiência de nutrientes no mosto. Segundo Andrzejewski *et al.* (2013), embora a levedura apresente um potencial metabólico para converter os açúcares presentes no caldo de sorgo sob condições limitadas de fosfato, ela não apresenta condições ótimas para alcançar uma taxa máxima de conversão.

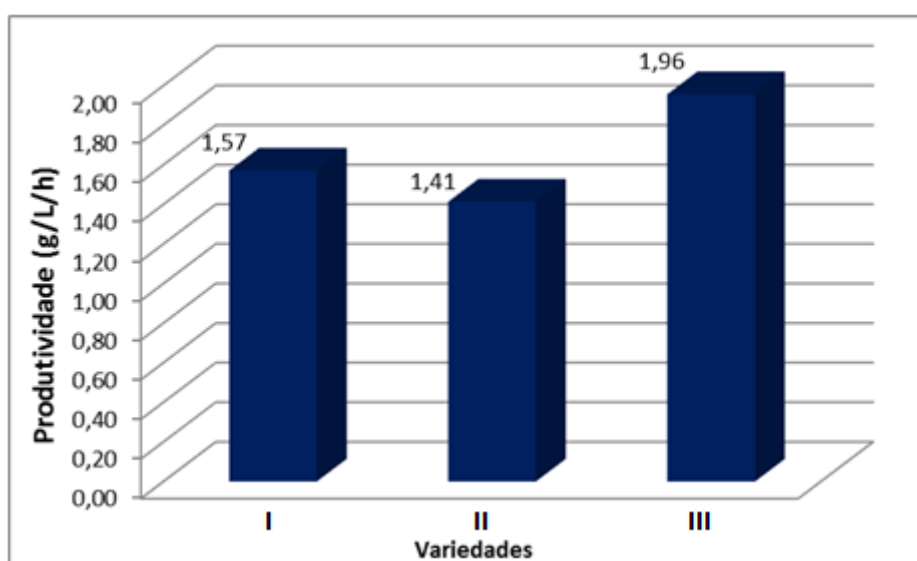
Figura 9 - Eficiência fermentativa em relação ao rendimento teórico máximo de etanol (0,511 g etanol/g açúcares).



Fonte: Autor, 2017

A produtividade em etanol para o sorgo ficou entre 1,41 e 1,57 g/L/h ao final de 21 horas de fermentação. Para a cana, a produtividade foi de 1,96 g/L/h (Figura 10). Silva *et al.* (2008), em um estudo de otimização de fermentação alcoólica de caldo de cana obteve uma produtividade máxima de 6,43 g/L/h. Para isso, o mosto foi suplementado com fontes de nitrogênio e de fósforo.

Figura 10 - Produtividade em etanol



Fonte: Autor, 2017

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho demonstraram que os rendimentos e produtividades do etanol obtidos da fermentação dos caldos de sorgo ficaram próximos ao do etanol obtido de cana-de-açúcar. Dessa forma, as variedades de sorgo sacarino avaliadas apresentam potencial para a produção de etanol, podendo ser utilizado na entressafra da cana-de-açúcar sem necessidade de modificação na planta de produção já existente.

Como esperado, os rendimentos ficaram abaixo do rendimento teórico máximo, que é $0,511 \text{ g}_{\text{etanol}}/\text{g}_{\text{açúcares}}$, variando entre 66,02 e 80,66%. As produtividades foram menores que outros resultados encontrados na literatura. Entretanto, estudos futuros podem ser realizados no sentido de otimizar o processo de fermentação, visando o aumento de rendimento, através do estudo da influência de fatores, tais como: tratamento do caldo, °Brix, temperatura da fermentação, concentração de levedura e suplementação de nutrientes.

6 REFERÊNCIAS

- ANDRZEJEWSKI, B ; EGGLESTON, G ; POWELL, R. **Pilot Plant Clarification of Sweet Sorghum Juice and Evaporation of Raw and Clarified Juices.** Industrial Crops and Products v. 49, p. 648-658. 2013.
- BONFIM-SILVA, E. M. et al. **Desenvolvimento inicial de gramíneas submetidas ao estresse hídrico.** Revista Caatinga, Mossoró, v. 24, p. 180-186, 2011.
- CARVALHO, L., BUENO, F. O. C. R., CARVALHO, M. M., FAVORETO, L. A, GODOY, F. A., **Cana-de-açúcar e álcool combustível: Histórico, sustentabilidade e segurança energética.** Goiânia. Centro científico conhecer, 2013. 14p.
- CALDAS, C.; BORÉM, A.; SANTOS, F. **Cana-de-açúcar: Bionergia, açúcar e etanol – Tecnologias e perspectivas.** 2ªEd. 2012.
- CONAB, Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana-de-açúcar. Abril, 2016/2017. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/>.
- DE SOUSA, J.L.U; MONTEIRO;R.A.B. **Fatores Interferentes na Fermentação Alcoólica para a Produção de Etanol.**Uberaba (MG). n.8, 100-1007. 2011.
- DELCIO, R., e ORTIZ, L. **Em direção à sustentabilidade da produção de etanol de cana de açúcar no Brasil.** 2006
- DE SÁ, C. B. C. **Caracterização de Linhagens de Saccharomyces cerevisiae e Zymomonas Mobilis para Aplicação na Produção de Bioetanol.** 2012. 91 f. Dissertação (Pós- Graduação em Biotecnologia Industrial)- Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.
- EMBRAPA, CENTRO NACIONAL DE MILHO E SORGO. Boletim agrometeorológico ano agrícola, 2003-2004. Sete Lagoas, MG, 2004.
- FERREIRA, O. **Produção de etanol a partir de sorgo sacarino com tratamento enzimático.** 2015. 98f. Universidade Estadual Paulista – UNESP, Jaboticabal.
- FERRARI, F. **Fatores Operacionais E Cinética Do Processo Fermentativo Para Otimização Da Produção De Etanol Em Escala Industrial.** Universidade Estadual Paulista –UNESP. Jaboticabal. 2013. 74 p.

GOMES, S. **Produção de etanol utilizando mix de sorgo sacarino e cana-de-açúcar em processo de maturação**. Universidade Estadual Paulista – UNESP. 64 p. Jaboticabal. 2014

GUIMARÃES, R. A. **Produção De Aguardente Utilizando O Sorgo Sacarino (Sorghum Bicolor (L.) Moench)**. Universidade Federal de Ouro Preto. 101 p. Ouro Preto – MG. 2013

GUIDOLIM, M. **Viabilidade do plantio do sorgo sacarino na entressafra da cana-de-açúcar**. Capivari – SP, 2012.

LEITE, G. H. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; SILVA, M. DE A.; VENTURINI FILHO, W. G. **Maturadores e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar Variedade RB855453 em início de safra**. Revista Bragantia, v.68, n.3, p.781-787, 2009.

LIMA, U. A.; AQUARONE, E. BORZANI, W.; SCHMIDELL, W. **Biotecnologia Industrial: Processos fermentativos e enzimáticos**. [S.l.]; Edgard Blucher Ltda, 2001. 593 p. v.3.

MASSON, S. I. **Produção de Bioetanol a partir da Fermentação de Caldo de Sorgo Sacarino e cana-de-açúcar**. Universidade Estadual Paulista – UNESP. 62 p. Jaboticabal. 2013.

MAY, A. **Cultivo de sorgo sacarino em áreas de reforma de canaviais**. Circular Técnica, Sete Lagoas, MG. Setembro, 2013.

MOURA, J. **Seletividade de Herbicidas e Avaliação Agronômica de Sorgo Sacarino no Semiarido**. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.62 p.

OLIVEIRA, T. F.; TARDIN, D. F.; SILVA S. R.; BARELLI, A. A. M. **Sorgo Sacarino: uma perspectiva sustentável na produção de combustível**. Revista do CEDS. Nº4. v.1.2016. Disponível em: www.undb.edu.br/ceds/revistadoceds.

PRATI, P.; CAMARGO, A. G. **Características do Caldo de Cana e Sua Influência na Estabilidade de Bebidas**. Campinas, V2. n.1. 2008.

PURCINO, A. **Sorgo sacarino na Embrapa: histórico, importância e usos**. Agroenergia em revista, Embrapa, n. 3, Agosto, 2011.

Normando Mendes Ribeiro Filho, N. M.; Florêncio, I. M.; Rocha, A. S.; Dantas, J. P.; Florentino, E. R.; Flávio Luís Honorato da Silva, F. L. H. **Aproveitamento do caldo do sorgo sacarino para produção de aguardente**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.10, n.1, p.9-16, 2008

RODRIGUES, D. L. **A cana-de-açúcar como matéria-prima para a produção de biocombustíveis: impactos ambientais e o zoneamento agroecológico como ferramenta para mitigação**. 2010. 64 p. Dissertação (Especialização em análise ambiental)-Faculdade de Engenharia da UFJF, Juiz de Fora, 2010

RODRIGUES, D.; ORTIZ, L. **Em direção à sustentabilidade da produção de etanol de cana-de-açúcar no Brasil.** Outubro, 2006.

SANTOS, F.; BORÉM, Aluizio; CALDAS, C. **Cana-de-açúcar Bioenergia, Açúcar e Etanol:** Tecnologias e Perspectivas. 2ª edição. Viçosa: Revista e Ampliada, 2012. 637 p.

SANTOS, A. M. **Estudo da Influência da Complementação de Nutrientes no Mosto sobre o Processo de Fermentação Alcoólica em Batelada.** 2008. 95 p. Alagoas, 2008.

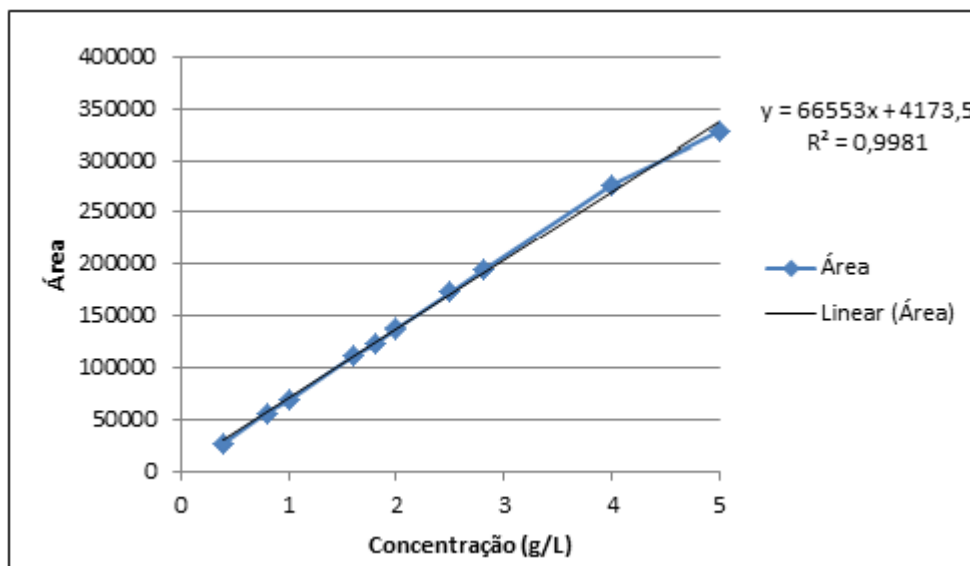
VASCONCELOS, S. M^a. **Pré-tratamentos hidrotérmico e com ácido fosfórico diluído de bagaço de cana-de-açúcar para aplicação em biorrefinarias.** 188 p. Recife, 2012.

ZANARDI, S. M.; JUNIOR, C. F. E. **Tecnologia e perspectiva da produção de etanol no Brasil.** Revista Liberato, Novo Hamburgo, v.17, n. 27, p.01-118. 2016

APÊNDICE A

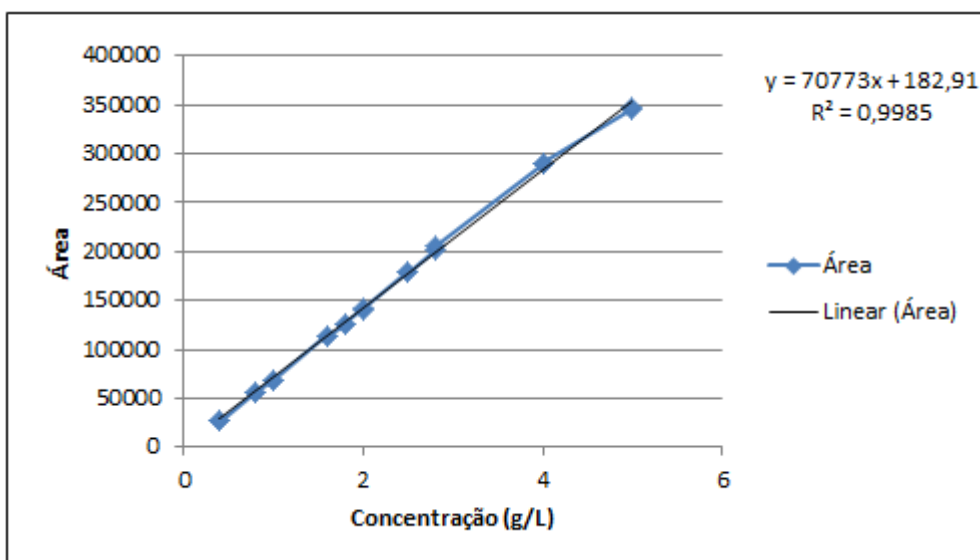
Curvas de calibração para os componentes analisados na fermentação.

Figura 11 - Curva padrão da área por concentração de glicose.



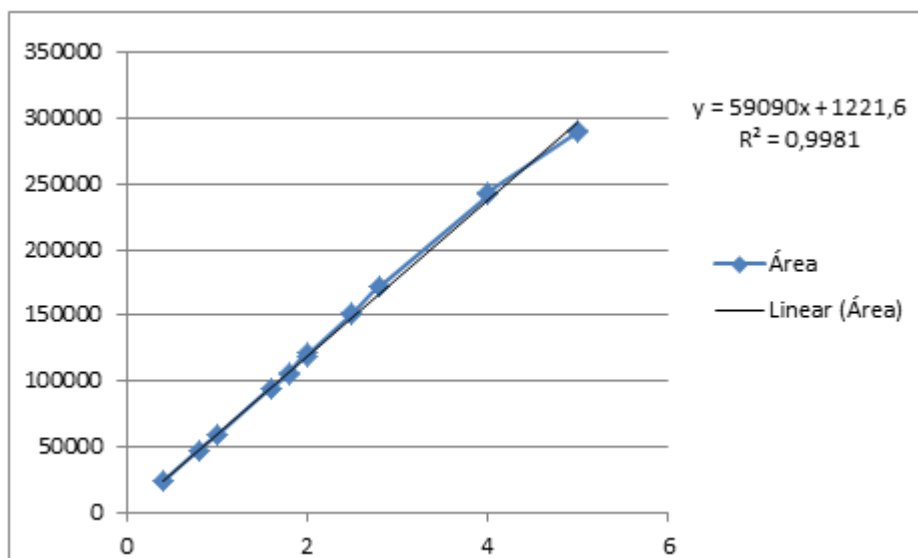
Fonte: Autor, 2017

Figura 12 - Curva padrão da área por concentração de frutose.



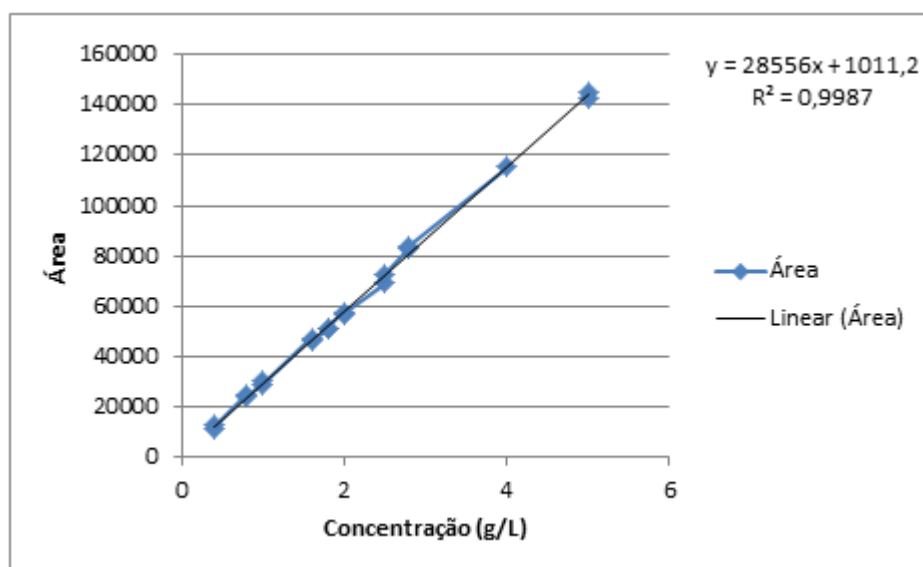
Fonte: Autor, 2017

Figura 13 - Curva padrão da área por concentração de glicerol.



Fonte: Autor, 2017

Figura 14 - Curva padrão da área por concentração de etanol.



Fonte: Autor, 2017